

( 1 ) 実施機関名：

東北大学

( 2 ) 研究課題(または観測項目)名：

摩擦すべりに伴うエネルギー散逸過程の解明

( 3 ) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

( 4 ) 地震発生・火山噴火素過程

ア．岩石の変形・破壊の物理的・化学的素過程

( 4 ) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

( 4 ) 地震発生・火山噴火素過程

ウ．摩擦・破壊現象の規模依存性

( 5 ) 本課題の 5 か年の到達目標：

地殻活動予測システムの構築のためには、断層面の強度を適切に記述することができる摩擦則が不可欠である。室内実験に基づいて、これまでにいくつかの摩擦則が提案されている。これらの摩擦則の素過程は、一般に、真実接触面積のすべり速度・接触時間依存性に基づいて理解されている。これは、摩擦面同士の固着、すなわち、歪エネルギーの蓄積過程に対する理解である。一方で摩擦すべりは必然的にエネルギーの散逸を伴う。散逸したエネルギーは、破損面やガウジ粒子の表面エネルギー、摩擦発熱による熱エネルギー、AE などの発生に伴う波動エネルギーの形で消費される。真実接触域の固着により蓄積されたエネルギーが、上記の 3 つの消費形態にどの程度配分されるのかを理解することは、摩擦すべりの挙動を支配する物理過程を理解する上で重要である。本課題では、室内すべり実験により、散逸エネルギーの分配法則を明らかにする。

( 6 ) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 21 年度：摩擦発熱によるエネルギー消費を見積もるために、実験的アスペリティーの実態と flash melting にかかわる摩擦構成式を検討する。

M2 震源断層貫通掘削コア試料の解析を行い、断層墓に伴う表面エネルギーを推定する。

平成 22 年度：地震に先行する電磁氣的異常を理解するために、先駆的な triboelectricity に関する固着すべり実験をおこなう。

波動としてのエネルギー散逸を推定する基礎として、広帯域 AE センサーを用いて、摩擦すべりに伴う AE の震源パラメータを推定する。

平成 23 年度以降：表面エネルギーの散逸過程を理解するために、すべり帯内部の構造 ( R - シアと Y - シア ) と固着すべり過程、強震動による断層破砕帯形成の可能性、断層ジョグでの粉碎の特異性を検討する。

波動エネルギー散逸過程を理解するために、AE の震源パラメータの载荷条件依存性を明らかにする。

(7) 平成 22 年度成果の概要：

固着-すべり実験について、22 年度は、模擬ガウジ層を跨いで 2 軸の歪ゲージを貼り、ガウジ層の歪成分をモニターするという実験を 21 年度より系統的に行った。その結果、固着すべり直前のゆっくりすべりに数%の膨張が伴われることが判明し、震源核の形成が R1 シアでのすべりによるという我々の仮説を裏付ける結果を得た。先駆的にゆっくりすべる断層面には、摩擦静電気によると思われる電位が発生することも実験的に突き止め、Tectonophysics に公表した。カンラン岩、高温型蛇紋岩 (antigorite)、および低温型蛇紋岩 (lizardite) の模擬ガウジ (0.3g) をハンレイ岩に挟み、封圧 60 - 174MPa で固着すべり実験を予察的に行った。摩擦係数はそれぞれ 0.73、0.67、0.5 であること、この順序で固着すべりを起こしやすいこと、lizardite であっても封圧 60MPa 以上なら固着すべりを起こすこと、lizardite と antigorite の場合、固着すべりの直前にゆっくりすべりを伴うが、カンラン岩の模擬ガウジでは伴わないことが多いこと、などの事が分った。Super-shear に関する実験を人工石英の単結晶で行った。その結果、固着すべりの間に  $V_r$  が約 3.2 km/s から約 6.4 km/s に加速したことが分かった。放射された弾性波は試料中軸部に集まり、試料は粉々に粉碎され、断層破碎の原因の一つになり得ることが分かった。

過去に行った安定すべり実験において、累積すべりの増加に伴って、AE の震源パラメタが変化することが示された。実験前後の断層面形状やそのスペクトルの比較から、この変化は、摩耗による断層面形状の変化に伴う断層面の接触状態の変化に起因していると推定されている。このことを検証するために、透明な試料を用いて実験を行い、累積すべりの増加に伴う接触状態の変化を直接観察する準備を開始した。

100m 規模の断層破壊先端では、室内実験に基づくスケールングを単純に外挿すると、数 ms の間に、数十 MPa の応力変化と数百 G の加速度が生じると予測される。既存の装置では、このような短時間に生じる大振幅の応力変化や加速度を計測できない。そこで、高容量・高応答速度のひずみ計および高容量の加速度計を開発した。期待されるひずみ変化の振幅が  $10^{-4}$  -  $10^{-3}$  と大きいので、ひずみ計は高感度である必要はない。そこで、共振周波数が数十 kHz 以上になるよう、ステンレス棒に歪ゲージを貼り付けただけの単純な構造にした。ステンレス棒 3 本を、互いに 60 度ずつ向きを変えて鞘管に収め、鞘管の軸に直交する面内のひずみを計測できるようにした。加速度計は、容量 500G の検出器を組み合わせてステンレス製のゾンデに収納した。この加速度計ゾンデの設計・製作は東京大学地震研究所 (課題 1423) と共同で行った。従来用いていた容量 50G の 3 成分加速度計では、縦方向の成分の共振周波数が低くなっていた。これは、ゾンデの形状が縦に長いためであると考えられる。そこで、今回、ゾンデを新たに設計するのに当たって、その形状に由来する感度や周波数特性の異方性を避けるため、縦横比が 1 に近づくよう配慮した。製作したゾンデを 1 m 立方程度の大きな岩石試料に埋設して打撃を行い、感度や周波数特性に異方性がないことを確認した。

南アフリカ金鉱山のひとつであるイズルイーニ金鉱山の地下約 1000m の坑道では、隣接する鉱山まで続いている、長さ数十 km に及ぶ断層が確認されている。この断層は、採掘域から数十 m 以内にある大きな応力擾乱を受けること、断層の連続性や平面性が高いこと、変質した断層帯内にすべり条痕が見られたことなどから、今後 1-2 年の採掘によって、この断層上で地震が発生する可能性が高いと考えられている。そこで、上記の歪計と加速度計を組み合わせる動的応力変化計とし、平成 22 年 10 月から 12 月にかけて、この断層から数 m 以内の位置に埋設した。12 月に、現場環境でのノイズレベルを測定するための連続観測を 24 時間行ったあと、観測を開始した。さらに、断層すべりに伴う摩擦発熱量から断層の絶対強度を推定するため、東京大学地震研究所 (課題 1427) と連携して、断層から 1m 以内に白金温度計を埋設した。温度の観測は、3 月末までに開始する予定である。

==== 平成 23 年度の成果 ====

断層破損過程の規模依存性を明らかにすることを目的とした、100m 規模の断層破壊先端での動的応力変化の直接計測を成功させる可能性を高めるため、イズルイーニ金鉱山に加えて、ドリーフォンテイン金鉱山でも同様の観測を行う準備を始めた。具体的には、ドリーフォンテイン金鉱山に埋設する動的応力変化計の組み立てや計器埋設孔の掘削を開始した。

室内実験に関しては、東日本大震災により試験機が移動し、防振板が外れるなどの軽度の被害があったため、復旧作業を行った。透明な試料を用いた摩擦実験により、断層面の接触状態を直接観察するための画像処理プログラムの開発を開始した。

( 8 )平成 22 年度の成果に関連の深いもので、平成 22 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

Onuma, K., Muto, J., Nagahama, H., and Otsuki, K., 2011, Electric potential changes associated with nucleation of stick-slip of simulated gouges. Tectonophysics, accepted.2/11

渡辺貴善, 2010, 動的応力変化計の開発 - 鉾山地震のすべり弱化過程の解明に向けて -, 東北大学大学院理学研究科修士論文。

( 9 )平成 23 年度実施計画の概要 :

固着-すべり実験については、Flash melting に関する実験結果を論文にする作業が遅れているが、これを急ぐ。先駆的ゆっくりすべりから高速すべりへの過程が、R1 シアから Y シアへという geometry に対応していることを直接的に実証する実験を行う。この実験を成功させた後にこの研究を論文にする。カンラン岩と蛇紋岩類の摩擦すべり実験結果を、forcing block と模擬ガウジの hardness の相違という視点から整理・補足実験し、先駆的ゆっくりすべりから高速すべりへの過程とリンクさせる。Super-shear と粉砕に関する実験を、天然の断層岩と比較しつつ、継続する。

断層面の接触状態を直接観察する手法を確立するため、透明な試料を用いて、予察的なすべり実験を行う。

イズルイーニ金鉾山での観測を継続し、えられたデータの解析を行う。また、イズルイーニ金鉾山の近くにあるドリフォンテイン金鉾山では、現在、掘削準備を行っている。断層破壊過程や摩擦発熱の直近観測の機会を増やすため、同鉾山にも動的応力変化計や白金温度計を埋設して、観測を開始する。

( 10 )実施機関の参加者氏名または部署等名 :

矢部康男・大槻憲四郎・他

他機関との共同研究の有無 : 無

( 11 )公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター

電話 : 022-225-1950

e-mail : zisin-yoti@aob.geophys.tohoku.ac.jp

URL : <http://www.aob.geophys.tohoku.ac.jp/>

( 12 )この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名 : 矢部康男

所属 : 東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター

電話 : 022-795-3893

FAX : 022-264-3292

e-mail : yabe@aob.gp.tohoku.ac.jp

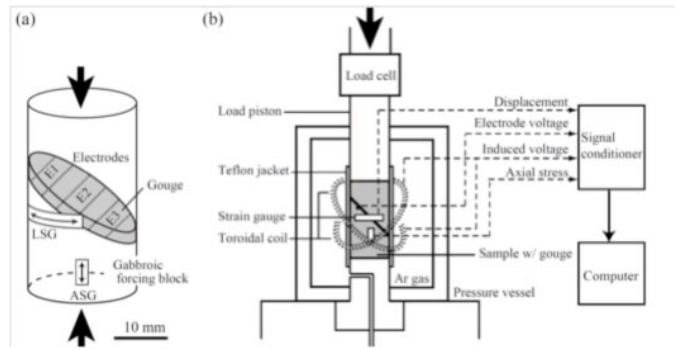


Fig. 1

石英を含まないハンレイ岩の間にハンレイ岩の模擬ガウジを挟み、すべり面に埋め込んだ3対の電極の電位、およびすべり面に平行と垂直に配置したトロイダルコイルに誘導される電位を計測した。

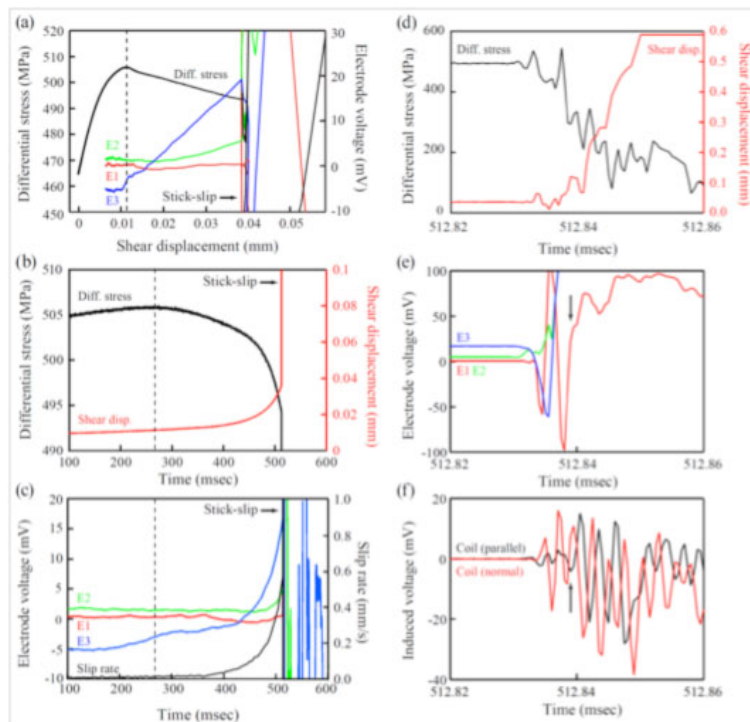


Fig. 2

封圧 165MPa での実験結果。軸応力のピークが過ぎ、大きな固着すべり（矢印）が起こる前にゆっくりしたすべりが起こり、先ず電極 E3 の電位が、次いで E2 の電位が増加した。すべり面に垂直に配置されたコイルにはすべり面に沿って流れる電流によって電位が誘導され、その振幅は大きな固着すべり直後におおきくなった。これらのことは、(1) 固着すべりの前に先駆的ゆっくりすべりが伴われること、(2) それに伴ってすべり面には摩擦電気による電位が不均質に発生すること、そして (3) 固着すべり時には電極電位が著しく増加するが、すべり面に沿う電流は摩擦溶融層が形成されてから増加することを示している。



Fig3  
動的応力変化計の全景 .